Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 493-508

Fusion of Multispectral and Radar Images to Enhance Classification Accuracy and Estimate the Area under Various Crops Cultivation

M. Saadikhani[1], M. M. Maharlooei[2*], M. A. Rostami[3], M. Edalat[4]

1- MSc Student in Biosystems Mechanical Engineering, Department of Biosystems Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Resource Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran
4- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Shiraz University, Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: maharlooei@uk.ac.ir)

Received: 25 August 2022 Revised: 26 October 2022 Accepted: 08 November 2022 Available Online: 21 November 2022	**How to cite this article:** Saadikhani, M., Maharlooei, M. M., Rostami, M. A., & Edalat, M. (2023). Fusion of Multispectral and Radar Images to Enhance Classification Accuracy and Estimate the Area under Various Crops Cultivation. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 493-508. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.78446.1123

Introduction

Remote sensing is defined as data acquisition about an object or a phenomenon related to a geographic location without physical. The use of remote sensing data is expanding rapidly. Researchers have always been interested in accurately classifying land coverage phenomena using multispectral images. One of the factors that reduces the accuracy of the classification map is the existence of uneven surfaces and high-altitude areas. The presence of high-altitude points makes it difficult for the sensors to obtain accurate reflection information from the surface of the phenomena. Radar imagery used with the digital elevation model (DEM) is effective for identifying and determining altitude phenomena. Image fusion is a technique that uses two sensors with completely different specifications and takes advantage of both of the sensors' capabilities. In this study, the feasibility of employing the fusion technique to improve the overall accuracy of classifying land coverage phenomena using time series NDVI images of Sentinel 2 satellite imagery and PALSAR radar imagery of ALOS satellite was investigated. Additionally, the results of predicted and measured areas of fields under cultivation of wheat, barley, and canola were studied.

Materials and Methods

Thirteen Sentinel-2 multispectral satellite images with 10-meter spatial resolution from the Bajgah region in Fars province, Iran from Nov 2018 to June 2019 were downloaded at the Level-1C processing level to classify the cultivated lands and other phenomena. Ground truth data were collected through several field visits using handheld GPS to pinpoint different phenomena in the region of study. The seven classes of distinguished land coverage and phenomena include (1) Wheat, (2) Barley, (3) Canola, (4) Tree, (5) Residential regions, (6) Soil, and (7) others. After the preprocessing operations such as radiometric and atmospheric corrections using predefined built-in algorithms recommended by other researchers in ENVI 5.3, and cropping the region of interest (ROI) from the original image, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated for each image. The DEM was obtained from the PALSAR sensor radar image with the 12.5-meter spatial resolution of the ALOS satellite. After preprocessing and cropping the ROI, a binary mask of radar images was created using threshold values of altitudes between 1764 and 1799 meters above the sea level in ENVI 5.3. The NDVI time series was then composed of all 13 images and integrated with radar images using the pixel-level

https://doi.org/10.22067/jam.2022.78446.1123

integration method. The purpose of this process was to remove the high-altitude points in the study area that would reduce the accuracy of the classification map. The image fusion process was also performed using ENVI 5.3. The support Vector Machine (SVM) classification method was employed to train the classifier for both fused and unfused images as suggested by other researchers.

To evaluate the effectiveness of image fusion, Commission and Omission errors, and the Overall accuracy were calculated using a Confusion matrix. To study the accuracy of the estimated area under cultivation of main crops in the region versus the actual measured values of the area, regression equation and percentage of difference were calculated.

Results and Discussion

Visual inspection of classified output maps shows the difference between the fused and unfused images in classifying similar classes such as buildings and structures versus regions covered with bare soil and lands under cultivation versus natural vegetation in high altitude points. Statistical metrics verified these visual evaluations. The SVM algorithm in fusion mode resulted in 98.06% accuracy and 0.97 kappa coefficient, 7.5% higher accuracy than the unfused images.

As stated earlier, the similarities between the soil class (stones and rocks in the mountains) and manmade buildings and infrastructures increase omission error and misclassification in unfused image classification. The same misclassification occurred for the visually similar croplands and shallow vegetation at high altitude points. These results were consistence with previous literature that reported the same misclassification in analogous classes. The predicted area under cultivation of wheat and barley were overestimated by 3 and 1.5 percent, respectively. However, for canola, the area was underestimated by 3.5 percent.

Conclusion

The main focus of this study was employing the image fusion technique and improving the classification accuracy of satellite imagery. Integration of PALSAR sensor data from ALOS radar satellite with multi-spectral imagery of Sentinel 2 satellite enhanced the classification accuracy of output maps by eliminating the high-altitude points and biases due to rocks and natural vegetation at hills and mountains. Statistical metrics such as the overall accuracy, Kappa coefficient, and commission and omission errors confirmed the visual findings of the fused vs. unfused classification maps.

Keywords: Confusion Matrix, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Radar Image, Sentinel 2 satellite, Support Vector Machine

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٥٠٨-٤٩٣

ادغام تصاویر چندطیفی و راداری به‌منظور افزایش دقت طبقه‌بندی و برآورد سطح زیر کشت محصولات زراعی

مهدی سعدیخانی[۱]، محمدمهدی مهارلویی[۲*]، محمدعلی رستمی[۳]، محسن عدالت[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

چکیده

سنجش از دور فنّ به‌دست‌آوردن اطلاعات درباره یک شئ، عارضه و یا پدیده‌های مربوط به یک منطقه جغرافیایی خاص بدون تماس فیزیکی با آن‌ها است. دستیابی به دقت بالا در طبقه‌بندی عوارض سطح زمین به کمک تصاویر چندطیفی همواره مد نظر پژوهشگران بوده است. یکی از عوامل کاهش دقت نقشه طبقه‌بندی، ناهموار بودن سطح زمین است. وجود نقاط مرتفع موجب می‌شود که سنجنده در دریافت دقیق اطلاعات بازتابی از سطح پدیده‌ها با مشکل روبه‌رو شود. تصاویر رادار با ارائه مدل رقومی ارتفاع (DEM) در شناسایی و تعیین ارتفاع پدیده‌های سطح زمین موثر است. استفاده از خصوصیات تصاویر دو سنجنده کاملاً متفاوت به‌منظور بهره‌گیری از قابلیت‌های مثبت آن‌ها با کمک روش ادغام تصاویر ممکن می‌شود. در این پژوهش به‌منظور برآورد سطح زیر کشت و طبقه‌بندی محصولات زراعی و سایر پدیده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ مربوط به منطقه باجگاه واقع در استان فارس استفاده شد. بدین منظور سری زمانی NDVI متشکل از ۱۳ تصویر ایجاد و با تصویر راداری سنجنده PALSAR در سطح پیکسل، با هدف حذف نقاط مرتفع، تلفیق شد. نتایج این پژوهش نشان داد طبقه‌بندی تصاویر برای شناسایی مزارع زیر کشت محصولات مختلف با دقت بالایی انجام شده است و سطح زیر کشت با دقت ۹۷درصد در گندم، ۹۹/۵درصد در جو و ۹۶/۵ درصد در کلزا نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مزرعه تخمین زده شده است. تصاویر ادغام‌شده دارای دقت کلی ۹۸/۱ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۷ بود که دقت کلی را نسبت به تصاویر مجزا ۷/۵ درصد بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: سنتینل۲، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)، ضریب کاپا، ماتریس آشفتگی، ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

سنجش از دور؛ فنّ به‌دست‌آوردن اطلاعات درباره یک عارضه و یا پدیده‌های مربوط به یک منطقه جغرافیایی است که از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی ابزاری است که در تماس فیزیکی با شیء و یا پدیده تحت بررسی نباشد (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015). امروزه سنجش از دور بیشتر به معنی مشاهده زمین از راه فضا بوده و با استفاده از ماهواره صورت می‌گیرد. برای این منظور می‌توان مشخصه‌های یک شیء و یا یک پدیده را بدون نیاز به منبع نور اندازه‌گیری و تجزیه وتحلیل کرد. در اصل، منبع داده‌های سنجش از دور تابش الکترومغناطیسی[۵] است که از شئ یا پدیده بازتاب یا تشعشع می‌شود (Johnson, 2009).

امروزه پیدایش تصاویر ماهواره‌ای با پوشش دوره‌ای متناوب، ارائه جزئیات بیشتر، سرعت بالاتر و دقت قابل‌قبول، باعث گسترش کاربردهای سنجش از دوری و افزایش تقاضا به خدمات سنجش از دور شده است. با استفاده از این داده‌ها مناطق تحت پوشش در فواصل زمانی کمی پایش می‌شوند و نقشه‌هایی با جزئیات زیاد می‌توانند تولید شوند. از این تصاویر می‌توان در برنامه‌ریزی شهری

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۲- دانشیار، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۳- استادیار پژوهش، بخش فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۴- دانشیار، بخش زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: maharlooei@uk.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.78446.1123

5- Electromagnetic radiation

اعم از مدیریت منابع طبیعی، گسترش شهری، برنامه‌ریزی شبکه حمل و نقل و نقشه‌برداری استفاده کرد (Ahmad, 2005).

با توجه به این‌که هدف اساسی فناوری سنجش از دور شناسایی و تفکیک پدیده‌های زمین است، بنابراین طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای مهم‌ترین مرحله تفسیر اطلاعات ماهواره‌ای محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی برای تهیه نقشه پوشش اراضی وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. انتخاب روش، به هدف مطالعه و داده‌های در دسترس بستگی دارد (Knorn *et al.*, 2009).

نقطه‌ی عطف پژوهش‌های سنجش از دور در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل پوشش‌های گیاهی در تصاویر چندطیفی توسط روز[1] و همکاران در سال ۱۹۷۴ میلادی ارائه‌ی شاخص تفاضلی نرمالیزه‌ی گیاهی (NDVI) بوده است. این شاخص که تا به امروز به‌عنوان شاخص اصلی تجزیه و تحلیل گیاهان از تصاویر چندطیفی در مقالات و پژوهش‌های مختلف همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Nouri *et al.*, 2017).

از میان این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش‌هایی با هدف کلی استخراج گیاه از تصویر (Malingreau, Tucker, & Laporte, 1989)، برآورد نوع محصولات، مقدار سطح زیرکشت و پایش رشد گیاهان (Myneni, Asrar, Tanre, & Choudhury, 1992)، طبقه‌بندی پوشش زمین (Senay & Elliott, 2000)، تشخیص زودهنگام قحطی و خشکسالی (Kogan, 1995) براساس تحلیل داده‌ها سنجش از دور در یک بازه زمانی مشخص و همچنین آنالیز آب وهوا (Bounoua *et al.*, 2000) اشاره کرد.

پایش و بررسی یک منطقه وسیع به نهادها و دستگاه‌های تصمیم گیر این امکان را می‌دهد تا بتوانند میزان سطح زیر کشت یک محصول خاص در یک منطقه را تعیین و به تبع آن میزان تولید آن محصول را پیش‌بینی کنند، تا علاوه بر تامین امنیت غذایی جامعه، سیاست‌های اقتصادی کشور نیز در بخش واردات و صادرات محصولات کشاورزی به شکل دقیق‌تری تنظیم شود (Rahnama, Maharlooei, Rostami, & Maghsoudi, 2019).

تغییر در پدیده‌ها و عرضه‌های زمینی در یک بازه زمانی به کمک داده‌های سری زمانی[2] قابل تحلیل و مطالعه است. این تحلیل‌ها امکان پیش‌بینی تغییرات در آینده را براساس آنچه در دوره‌های زمانی گذشته اتفاق افتاده است را فراهم می‌نماید. سری زمانی به ساده‌ترین مفهوم، عبارت است از ارزیابی تغییرات تدریجی که در بازه زمانی نسبتا طولانی اتفاق افتاده است (Wang, Li, Gao, Sun, & Du, 2014). بررسی محل، وسعت، نوع و تکرار تغییرات پوشش زمین، همچنین شناسایی الگوهای مکانی و زمانی تغییرات از طریق تفسیر و تجزیه و تحلیل نقشه‌های مکرر پوشش زمینی، دیدی وسیع از فرایندهای مسبب تغییر اساسی را فراهم می‌کند (Gomez, White, & Wulder, 2016).

استفاده از داده‌های به‌دست آمده از چندین سنجنده مزایای بسیار زیادی در مقایسه با استفاده از داده‌های حاصل از سنجنده‌های منفرد دارد. برای نمونه، استفاده از انواع داده‌های برداشت‌شده از طریق سنجنده‌های مختلف باعث افزایش دقت طیفی و مکانی در فرآیند مشاهده و تخمین می‌شود (Zhang, Ghamisi, & Li, 2017). به همین دلیل امروزه، ادغام و ترکیب داده‌های مختلف به‌منظور دستیابی به اطلاعات جدید که حاوی جنبه‌های اطلاعاتی مفید در هر یک از داده‌های اولیه باشد، جایگاه ویژه‌ای دارد. در میان سنجنده‌های موجود، سنجنده‌های راداری و چندطیفی به علت توانایی بالا در جمع‌آوری اطلاعات ارتفاعی و طیفی مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند (Fang, He, Li, Ghamisi, & Benediktsson, 2017).

یکی از جدیدترین روش‌های مورد استفاده در سنجش از دور، ادغام تصویر[3] است. این روش از شاخه‌های مربوط به ترکیب اطلاعات[4] است که در آن دو یا چند تصویر متفاوت از یک صحنه مشابه توسط الگوریتم ادغام با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا تصویر جدیدی تولید شود (Efimov, Kolchaev, Nikiforov, & Novikov, 2018).

در پژوهشی که به‌منظور شناسایی و پهنه‌بندی گونه مهاجم تمشک کوهی (American Bramble) در یک پارک ملی در آفریقای جنوبی انجام شد نتایج ادغام تصاویر ماهواره سنتینل۲[5] و لندست۸ با باندهای راداری ماهواره سنتینل۱ در طی فصول مختلف سال نشان داد که استفاده از طبقه‌بندی نظارت‌شده ماشین بردار پشتیان در تصاویر ادغام‌شده ماهواره سنتیل۲ با دقت ۷۶ درصد انجام شده‌است. این دقت برای تصاویر ادغام‌شده ماهواره لندست۸ حدود ۷۲ درصد گزارش شده است (Rajah, Odindi, & Mutanga, 2018).

در پژوهش دیگری در کلمبیا به‌منظور شناسایی سطح زیر کشت درخت پالم (Palm Oil Tree) از داده‌های ماهواره سنتنیل۲ و باندهای راداری ماهواره سنتیل۱ استفاده شد. داده‌ها در دو وضعیت استفاده از داده‌های باندهای مرئی ماهواره سنتیل۲ بدون انجام ادغام و ادغام‌شده با باندهای راداری ماهواره سنتیل۱ برای شناسایی درخت پالم با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی[6] تحلیل گردید. نتایج نشان داد بالاترین دقت کلی در طبقه درخت پالم ۸۲/۱۴ درصد بوده که در شرایط ادغام تصاویر به‌دست‌آمده است. این در حالی‌است که دقت طبقه‌بندی در وضعیت ادغام‌نشده حدود ۱۱/۵

1- Rouse
2- Time Series Data
3- Image Fusion
4- Data Integration
5- Sentinel 2
6- Random Forest

درصد کمتر بوده است (Monsalve-Tellez, Torres-León, & Garcés-Gómez, 2022).

وجود نقاط مرتفع در تصویر چندطیفی موجب ایجاد خطاهایی در تفکیک و طبقه‌بندی پدیده‌ها می‌شود. نتایج تحقیقی که در منطقه بم به‌منظور پایش سطح زیر کشت نخلستان خرما با استفاده از تصاویر ماهواره لندست۸ انجام شد نشان داد که الگوریتم‌های طبقه‌بندی در تفکیک مناطق کوهستانی داری پوشش مرتعی با پدیده‌های زراعی که در مناطق کم‌ارتفاع قرار دارند، دچار خطا می‌شوند (Rahnama, Maharlooei, Rostami, & Maghsoudi, 2018). نقشه خروجی فرآیند طبقه‌بندی حاوی پیکسل‌های مخلوط است که این امر موجب کاهش کمی و کیفی دقت طبقه‌بندی می‌شود. به علت قابلیت تصاویر راداری در ارائه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، استفاده هم‌زمان از تصویر راداری و تصویر چندطیفی می‌توانند در حذف مناطق مرتفع کوهستانی از تصویر موثر باشد.

یکی از ماهواره‌هایی که داده‌های بسیار کاربردی در زمینه مطالعات علوم زمین تهیه و در اختیار کاربران قرار می‌دهد، ماهواره آلوس[1] می‌باشد، که در ژاپن به‌عنوان دایچی[2] شناخته می‌شود. این ماهواره دارای ۳ سنجنده است که سنجنده PALSAR[3] آن راداری است. داده‌های خروجی ارتفاعی این سنجنده برای تهیه توپوگرافی و مطالعه پوشش‌های گیاهی بسیار مفید است.

این پژوهش با هدف طبقه‌بندی پوشش گیاهی و محاسبه سطح زیر کشت زمین‌های زراعی و بررسی استفاده از روش ادغام تصویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ و تصویر راداری ماهواره آلوس به‌منظور افزایش دقت نقشه طبقه‌بندی پوشش گیاهی و سایر پدیده‌های زمینی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزارع دانشکده کشاورزی واقع در ۱۵ کیلومتری شهرستان شیراز انجام شد. شیراز در بخش مرکزی استان فارس، در ارتفاع ۱۴۸۶ متر بالاتر از سطح دریا و در منطقه کوهستانی زاگرس واقع شده و آب و هوای معتدلی دارد. دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در منطقه باجگاه در ۱۵ کیلومتری شمال غربی شیراز و بین طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی واقع است. شکل ۱ محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

برای دستیابی به اهداف این پژوهش، نرم‌افزارهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفت. از نرم‌افزار ENVI[4] (نسخه ۵٫۳، توسعه‌یافته شرکت ITT VIS، آمریکا) به‌منظور پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای، استفاده شد. این نرم‌افزار شامل ابزارهای تصحیح هندسی، تصحیح اتمسفری، تجزیه و تحلیل زمین، تجزیه و تحلیل تصاویر راداری، برخی قابلیت‌های GIS برداری و رستری، پشتیبانی تصاویر با فرمت‌های مختلف و غیره می‌باشد (Rahnama *et al.*, 2018).

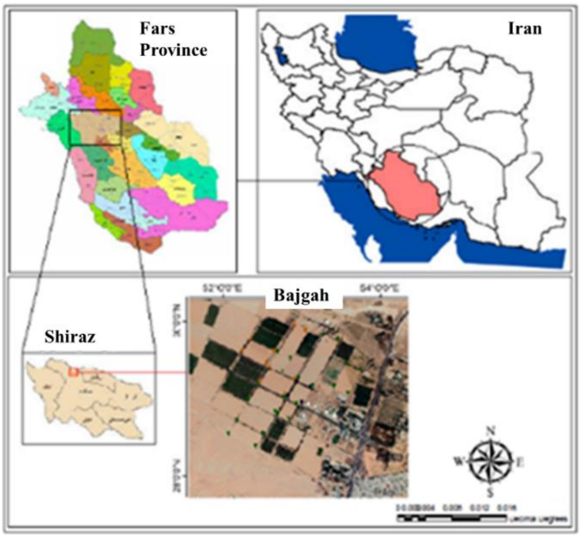
نرم‌افزار ArcGIS (نسخه ۱۰٫۵، توسعه‌یافته شرکت ESRI، آمریکا) برای تبدیل انواع داده‌های رقومی به فرمت برداری و انتقال تصاویر پردازش‌شده جهت اعمال روش کارتوگرافی بهره گرفته شد. برای ثبت موقعیت زمینی پدیده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، از یک سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) دستی (Garmin، مدل GPSMAP62s، تایوان) استفاده شد. نقاط ثبت‌شده در حافظه دستگاه، با استفاده از نرم‌افزار BaseCamp (نسخه ۱٫۱، توسعه‌یافته شرکت Garmin، تایوان) تخلیه و به‌صورت یک نقشه وکتوری مورد استفاده قرار گرفت.

برای جمع‌آوری داده‌های سنجش از دور، از تصاویر ماهواره سنتینل۲ استفاده گردید. این ماهواره، دومین سری از ماهواره‌های سنتینل، از نوع مدار قطبی است که از ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول موج کوتاه برخوردار است. در این پژوهش از ۱۳ تصویر که از ۲۱ نوامبر ۲۰۱۸ تا ۳۰ ژوئن ۲۰۱۹ دریافت شده است، استفاده گردید. بر اساس اهداف تحقیق؛ از باندهای مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول موج کوتاه، در قالب یک دیتاست[5] ۵ باندی استفاده شد و مشخصات باندهای مورد استفاده جهت ایجاد دیتاست در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور حذف نقاط مرتفع، از تصاویر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) سنجنده PALSAR ماهواره آلوس استفاده شد. تصاویر مورد استفاده از توان تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و توان تفکیک رادیومتریک ۱۶ بیت برخوردار هستند که در فرایند ادغام با تصاویر ۱۰ متری ماهواره سنتینل۲، نتیجه بسیار مطلوبی ارائه می‌دهد. ابعاد تصویر این ماهواره ۶۳۸۲×۵۶۷۴ پیکسل می‌باشد. عرض تصویر به‌دست‌آمده از سنجنده این ماهواره ۷۰ کیلومتر است (Abdikan, 2018).

برای به‌دست‌آوردن اطلاعات دقیق مرجع زمینی[6] در مورد پدیده‌های موجود، طی چندین مرحله، به منطقه مورد مطالعه مراجعه و موقعیت جغرافیایی هر یک از پدیده‌ها (موقعیت جغرافیایی مزارع مختلف، ساختمان‌ها، زمین‌های آیش، جاده و غیره) برداشت شد.

1- Advanced Land Observation Satellite (ALOS)
2- Daichi
3- Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
4- Environment For Visualizing Images
5- Dataset
6- Ground Truth



شکل ۱- محدوده مطالعاتی تحقیق

Fig.1 The study region map

جدول ۱- باندهای مورد استفاده جهت ایجاد دیتاست

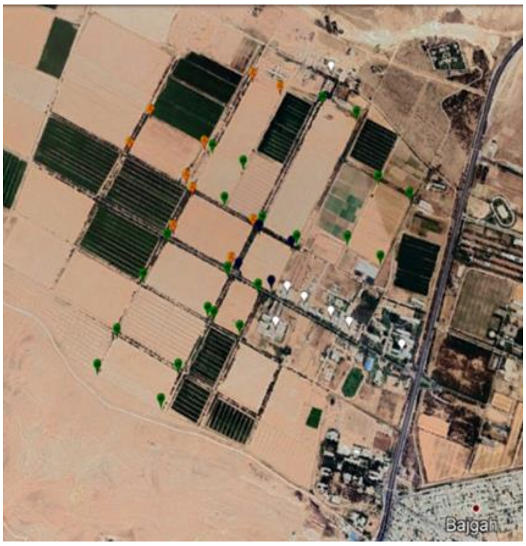
Table 1- Spectral bands used to create dataset

Spectral Band باند طیفی	Spatial resolution (m) توان تفکیک مکانی	Wavelength (nm) طول موج
Band 2 (Blue) باند ۲ (آبی)	10	490
Band 3 (Green) باند ۳ (سبز)	10	560
Band 4 (Red) باند ۴ (قرمز)	10	665
Band 8 (NIR) باند ۸ (مادون قرمز نزدیک)	10	842
Band 11 (SWIR) باند ۱۱ (مادون قرمز موج کوتاه)	20	1610

نقاط برداشت‌شده به‌صورت یک فایل وکتوری وارد نرم‌افزار Arc Map شدند و پس از اصلاح سیستم مختصات فایل وکتوری، از نمونه‌های مربوط به هر کلاس به‌صورت مجزا خروجی تهیه شد. سپس شیپ فایل[1] مربوط به هر کلاس وارد نرم‌افزار ENVI 5.3 شده و نسبت به ساخت نمونه مرجع زمینی جهت فرایند اعتبارسنجی اقدام گردید. شکل ۲ نقاط برداشت‌شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

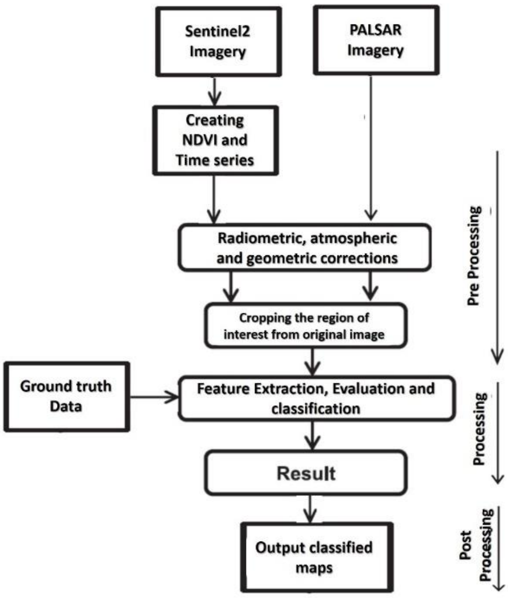
مراحل انجام این مطالعه، شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است. مرحله پیش‌پردازش شامل دریافت تصاویر ماهواره‌ای از وب‌گاه شرکت‌های ارائه‌دهنده، تهیه تصاویر سری زمانی از تصاویر ماهواره سنتینل۲، انجام تصحیحات مختلف و برش تصاویر اصلی هر دو ماهواره برای محدوده مورد مطالعه و در نهایت ادغام تصاویر است. مرحله پردازش شامل استخراج ویژگی‌ها، طبقه‌بندی عوارض و ارزیابی دقت طبقه‌بندی براساس داده‌های مرجع زمینی است. آخرین مرحله مربوط به پس‌پردازش داده‌ها می‌باشد که به تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده می‌پردازد. روش انجام تحقیق و نحوه کار با تصاویر دریافتی از هر دو ماهواره در فلوچارت شکل ۳ آورده شده است.

1- Shape File (*.shp)



شکل ۲– نقاط برداشت‌شده با دستگاه GPS. نقاط با رنگ‌های مختلف برای تشخیص عارضه‌های مختلف زمینی است.

Fig.2. Marked points using handheld GPS. Points with various colors show different phenomena



شکل ۳– فلوچارت مراحل آماده‌سازی و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای برای طبقه‌بندی عوارض زمینی

Fig.3. Flowchart demonstrating the preprocessing and employing of the satellite images for land cover phenomena classification

با توجه به این‌که تصاویر مورد استفاده در این تحقیق از لحاظ سطح پردازش در سطح L1C قرار داشتند و در این سطح از پردازش معمولاً تبدیل‌های اصلی صورت نگرفته است، بنابراین بایستی پیش‌پردازش‌های مناسب بر روی باندهای تصویر انجام گیرد. قبل از پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای، لازم بود باندهای مورد نیاز تصویر در قالب یک دیتاست ایجاد شده و سپس تصویر جدید در نرم‌افزار فراخوانی شود. به این منظور باندهای مورد نیاز که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شد، به‌صورت تکی فراخوانی و از هر کدام از باندها به‌عنوان یک لایه[1] جداگانه خروجی گرفته شد. در نهایت لایه‌ها با هم ترکیب شده و یک دیتاست ۵ باندی ایجاد گردید.

در این مطالعه برای تصحیح خطاهای هندسی تصاویر ماهواره‌ای، از ابزار تصحیح هندسی نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. همچنین،

1- Layer

بـه‌منظـور حـذف اثـرات اتمسـفری در تصـاویر مـورد اسـتفاده، از الگوریتم QUAC[1] در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده گردید. با توجه بـه این‌که تصاویر مورد اسـتفاده در ایـن مطالعـه مربـوط بـه زمـان‌هـای مختلـف بودنـد و بـا زاویـه ارتفـاعی و روش‌هـای مختلـف برداشـت می‌باشند، نیاز بود تا تصـحیحات رادیومتریـک و جـوی روی تصـاویر انجام شود. بدین منظور تصـاویر مـاهواره‌ای بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار ENVI 5.3 و با روش کالیبراسیون[2] تصحیح شدند، به این ترتیب که ابتدا مقـادیر تـابش[3] تصـویر بـا بـه‌کـارگیری الگـوریتم FLAASH[4] محاسبه و در مرحله نهایی مقادیر بازتابش[5] هر تصویر محاسبه گردید، و با استفاده از رابطه (۱) بازه مقادیر تصویر بین ۰ و ۱ تعریف شد.

$$Rescale=(Y\leq 0)\times 0+(Y\geq 10000)\times 1+(0\leq Y\leq 10000)\times \frac{Y}{10000} \quad (۱)$$

Y: تصویر خروجی الگوریتم FLAASH

اندازه بزرگ تصاویر ماهواره سنتینل۲ از سـطح زمـین (ابعـاد هـر تصویر ۱۰۹۸۰×۱۰۹۸۰ پیکسل می‌باشد) و لزوم پردازش حجم وسیع از اطلاعات، موجب پیچیده و زمان‌بر شدن فرآیند پردازش می‌شود. به همین دلیل برای افزایش سرعت کار و همچنین دقت فرآیند پردازش، محدوده مورد مطالعـه، بـا ابعـاد ۵۴۰× ۵۴۰ پیکسـل، از روی تصـویر اصلی که مراحل پیش‌پردازش روی آن‌ها اعمال شده بود بـرش زده و جدا شد. فرآیند مذکور در محـیط نـرم‌افـزار ENVI 5.3 انجـام شـد. نتیجه خروجی حاصل از برش تصویر، در شکل ۴ ارائه شده است.

برای ادغام کـردن تصـاویر دو مـاهواره مختلـف بایـد مختصـات جغرافیایی هر دو تصـویر یکسـان باشـد، در غیـر ایـن‌صـورت نتـایج به‌دست‌آمده با خطا همراه خواهد بود. بدین منظور باید تصاویر راداری نیز مانند تصاویر چندطیفی از روی تصویر اصلی برش داده شوند. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که، تصـاویر راداری و چندطیفی برش‌خورده باید عینا با هم منطبق باشند تا در فرآیند ادغـام خطا ایجاد نشود. نتیجه این فرآیند در شکل ۵ آمده است.

در این پژوهش به‌منظور طبقه‌بندی پدیـده‌هـای سـطح زمـین در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر سری زمانی حاصل از شاخص NDVI استفاده شد. به این ترتیب که بـا اسـتفاده از رابطـه ریاضـی شـاخص NDVI، در محیط نرم‌افزار ایـن شـاخص بـرای ۱۳ تصـویر اخذشـده محاسبه و سپس تصاویر خروجی با هم ترکیب و دیتاست سری زمانی ایجـاد شـد. بانـدهای تشـکیل‌دهنـده تصـویر سـری‌زمـانی تصـاویر دریافت‌شده در تاریخ‌های مختلـف در بـازه زمـانی یادشـده در مقدمـه است. شکل ۶ مکعب دیتاست سری‌زمانی NDVI را ارائه می‌نماید.

مراحل ادغام تصاویر راداری ماهواره آلوس با تصـاویر چنـدطیفی ماهواره سنتینل۲ در این پژوهش به‌طور خلاصه در شکل ۷ نشان داده شده است. بدین منظور ابتدا ارتفاع کلیه نقاط منطقه مـورد مطالعـه از ماهواره راداری استخراج و براساس نقشه‌های رقومی موجود، نقاط بـا محدوده ارتفاعی ۱۷۶۴ تا ۱۷۹۹ متر از سطح دریا آستانه‌گذاری شـد و به رنگ آبی مشخص می‌شود و لایه ماسک با استفاده از ابزار Build Mask به‌صورت باینری (سیاه و سفید) در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 برای تصویر ماهواره ALOS تهیه شد. لایـه ماسـک سـاخته‌شـده در تصویر اصلی ضرب شد و به این ترتیب نقاط با ارتفاع مجاز که دارای مقدار عددی یک در لایه ماسک بود، در تصویر باقی ماند و سایر نقاط عمدتا نقاط مرتفع کوهستانی حذف شدند. نتیجه نهایی فرآینـد ادغـام تصویر در شکل ۶ نمایش داده شده است.

برای انجام فرآیند طبقه‌بندی در این تحقیـق بـا توجـه بـه نتـایج پژوهش‌های مرتبط پیشـین (Abdikan, 2018; Rahnama *et al.*, 2019) از روش طبقـه‌بنـدی نظـارت‌شـده و الگـوریتم ماشـین بـردار پشتیبان (SVM) تصاویر سری زمانی NDVI استفاده شد. ایـن روش یک طبقه‌بندی‌کننده دودویی[6] و خطی است کـه بـا اسـتفاده از توابـع کرنل، به منزله یک طبقه‌بندی‌کننده چندکلاسی و غیرخطی نیز به‌کار مـی‌رود (Arekhi & Adibnejad, 2011). بـرای اسـتفاده در حالـت چندکلاسه، ابتدا باید چند طبقه‌بندی‌کننده دودویی طراحـی شـود و در نهایــت طبقــه‌بنــدی نهــایی بــا اســتفاده از ادغــام اطلاعــات طبقه‌بندی‌کننده‌های دودویی انجام شود. انجام این فرآیند بـا دو روش یکی در مقابل بقیه[7] و دسته‌بندی زوج–زوج[8] اجـرا مـی‌شـود. ایـن دو روش به گونه‌ای سعی در استخراج اطلاعاتی از مرزهای بین کلاس‌ها دارند. در روش دسته‌بندی کردن زوج–زوج، میزان اطلاعاتی که از مرز بین کلاس‌ها استخراج می‌شود، بسیار بیشتر از اطلاعاتی است کـه بـا روش یکی در مقابل بقیه به‌دست می‌آیـد (Arekhi & Adibnejad, 2011).

در مطالعه حاضر الگوریتم SVM با روش زوج–زوج مقادیر عامـل جریمه[9] و سطح هرم[10] به‌صورت خودکار و بر اساس مقادیر نرم‌افزاری به‌ترتیب ۱۰۰ و ۰ در نظر گرفته شد. بـه‌منظـور بررسـی تـاثیر ادغـام تصاویر در دقت طبقـه‌بنـدی، فرآینـد طبقـه‌بنـدی در دو وضـعیت ۱) تصاویر سری زمانی ادغام‌شده ماهواره سنتینل۲ بـا داده هـای راداری ماهواره آلوس و ۲) تصاویر سری زمانی بدون ادغام ماهواره سـنتینل۲ انجام شد.

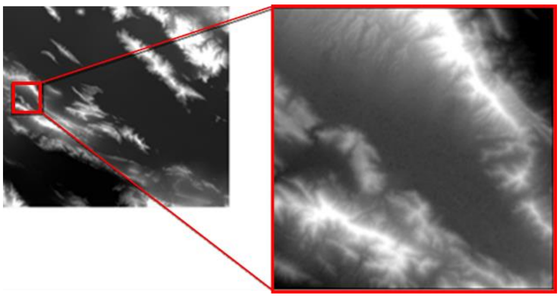
1- Quick Atmospheric Correction
2- Radiometric Calibration
3- Radiation
4- FLAASH Atmospheric Correction
5- Reflection

6- Binary
7- One-against-all
8- One-against-one
9- Fine agent
10- Surface of the Pyramid



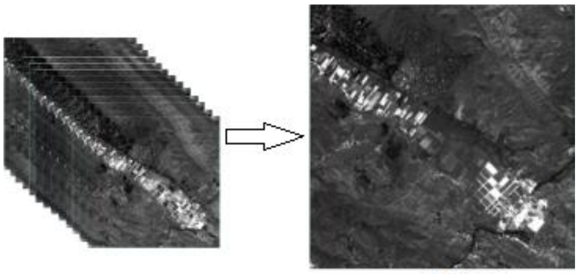
شکل ٤– تصویر اصلی و محدوده برش‌خورده دریافتی از ماهواره

Fig.4. Original Sentiel 2 satellite imagery and the cropped region



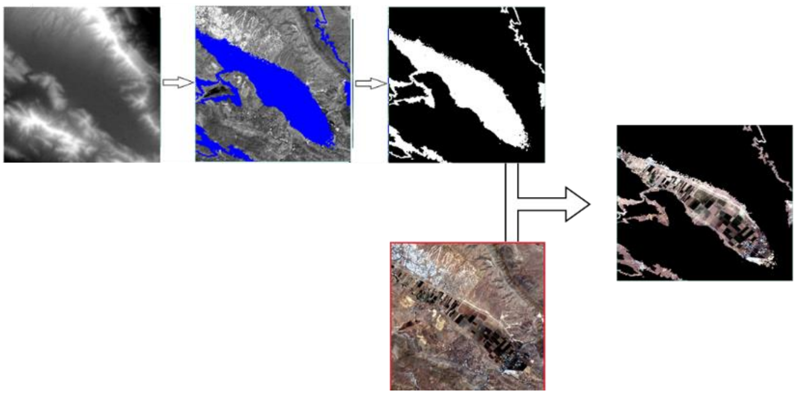
شکل ۵– تصویر اصلی و محدوده برش‌خورده مدل رقومی ارتفاعی ماهواره راداری

Fig.5. Original and cropped DEM of radar satellite



شکل ٦– مکعب دیتاست سری زمانی NDVI

Fig.6. NDVI Time series dataset cube



شکل ۷– مراحل آماده‌سازی لایه ماسک از تصاویر راداری و ادغام آن با تصاویر ماهواره سنتینل ۲

Fig.7. Procedure for preparing the mask layer from radar imagery and fusing it with the Sentinel 2 satellite imagery

در این مطالعه برای انتخاب نمونه‌های تعلیمی از عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی و همچنین نقاط برداشت‌شده با دستگاه GPS در عملیات میدانی استفاده شده و سعی شد پیکسل‌های تعلیمی برای هر کلاس معین در داخل منطقه همگن با پراکنش مناسب ایجاد شود. تعداد پیکسل به‌کار گرفته‌شده در هر نمونه تعلیمی، حداقل به اندازه ده برابر تعداد باندهای طیفی سنجنده مورد استفاده انتخاب گردید (Tuia, Merenyi, Jia, & Grana-Romay, 2014). جدول ۲ مشخصات داده‌های اعتبارسنجی مرجع زمینی را نشان می‌دهد. در این جدول کلیه عوارض زمینی موجود در منطقه مورد مطالعه طی بازدیدهای میدانی مشخص گردید و نام هر کلاس عارضه به‌همراه توصیف آن آورده شده است. تعداد نمونه‌های برداشت‌شده در هر کلاس نیز آورده شده است.

جدول ۲– مشخصات نمونه‌های میدانی اعتبارسنجی برای طبقه‌بندی نظارت‌شده

Table 2- Specifications of ground truth annotation for supervised classification

کد کلاس Class code	نام کلاس Class Name	توصیف کلاس Class Description	تعداد نمونه‌ها Number of Samples
1	Wheat	Irrigated and rain-fed wheat fields	130
2	Barley	Barley fields	80
3	Canola	Canola fields	120
4	Soil	Bare soil, uncultivated fields	110
5	Tree	Orchards and green belts	50
6	Residential	Niyayesh and Sadra towns, administrative offices	50
7	Others	Alfalfa and other minor crop fields	80

پس از طبقه‌بندی، به‌منظور تعیین قابلیت داده‌های ماهواره‌ای و مقایسه نتایج طبقه‌بندی با داده‌های زمینی با هدف ارزیابی صحت نقشه‌های حاصل از طبقه‌بندی باید نتایج صحت‌سنجی شوند. از آن‌جایی که امکان کنترل تمام پیکسل‌های تصویر با واقعیت‌های زمینی وجود ندارد بدین منظور، باید از نمونه‌های آزمایشی به‌عنوان کلاس صحیح زمینی استفاده شود. ارزیابی خطا و برآورد صحت طبقه‌بندی معمولاً بر اساس پارامترهای آماری که از ماتریس آشفتگی[1] استخراج می‌شود، انجام می‌گیرد. این ماتریس حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل نمونه‌های آموزشی در واقعیت زمینی با پیکسل‌های متناظر در نتایج طبقه‌بندی است که دقت طبقه‌بندی کل تصویر را در یک جدول نشان می‌دهد (Lillesand *et al.*, 2015).

با محاسبه پارامترهای دقت کلی[2]، ضریب کاپا[3]، خطای حذف‌شده[4] و خطای گماشته[5] کیفیت طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت (Palubinskas, Makarau, & Tao, 2011; Rahnama *et al.*, 2019)

از آن‌جا که دانستن سطح زیر کشت دقیق و براورد مقدار تولیدی محصولات استراتژیک از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، در این تحقیق پس از طی تمامی مراحل پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش، تصویر با بالاترین دقت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا انتخاب گردید و مساحت پدیده های موجود در تصویر محاسبه شد. با مقایسه مساحت‌های تخمین زده شده از تصاویر ماهواره‌ای و مساحت واقعی اراضی در منطقه که از طریق نمونه‌برداری‌های میدانی به‌دست آمده بود، دقت مساحت تخمین‌زده‌شده با استفاده از شاخص‌های درصد تغییر و معادله رگرسیونی ارزیابی شد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا مقایسه‌ای کیفی بین تصویر طبقه‌بندی‌شده حاصل از فرآیند ادغام تصاویر دو ماهواره سنتینل۲ و آلوس با نتیجه طبقه‌بندی تصویر ادغام‌نشده ماهواره سنتینل۲ صورت می‌گیرد، سپس نتایج حاصل از طبقه‌بندی نظارت شده تصویر سری زمانی NDVI، در دو وضعیت ادغام‌شده و ادغام‌نشده ارائه می‌شود و در نهایت نتایج مربوط به اعتبارسنجی نقشه طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس آشفتگی به تفصیل بیان می‌گردد.

طبقه‌بندی نظارت‌شده

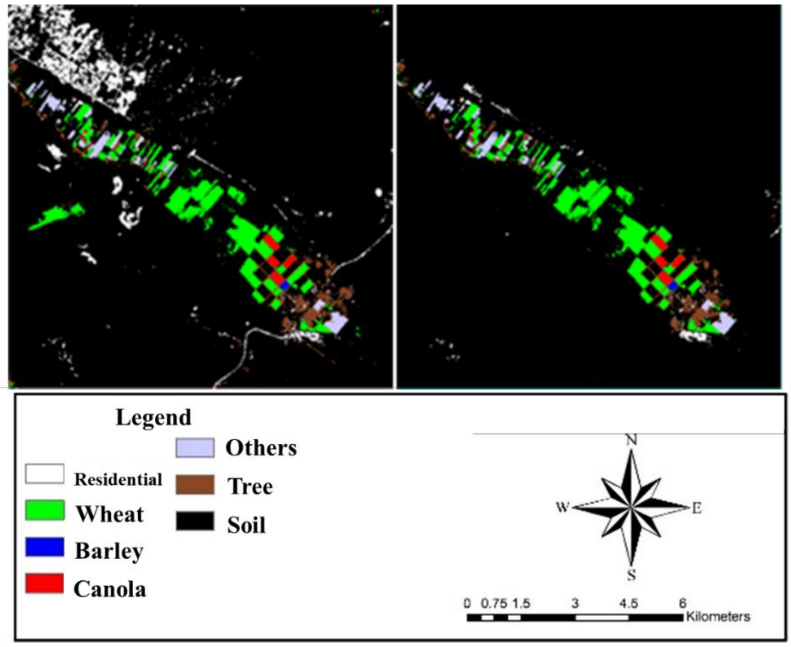
طبقه‌بندی تصویر سری‌زمانی NDVI با استفاده از الگوریتم SVM انجام شد. با استفاده از این روش طبقه‌بندی، تعداد ۷ کلاس پدیده، تفکیک شد. الگوریتم در دو وضعیت ادغام‌شده و ادغام‌نشده

1- Confusion matrix
2- Overall accuracy
3- Kappa coefficient
4- Omission Error
5- Commission Error

به‌ترتیب، دقت کلی ۹۸/۰۶٪ (ضریب کاپای ۰/۹۷) و ۹۰/۴۸٪ (ضریب کاپای ۰/۸۹) ایجاد کردند. نتیجه ارزیابی طبقه‌بندی، با استفاده از ماتریس آشفتگی بیانگر این موضوع است که ادغام تصویر راداری و چندطیفی و به تبع آن حذف نواحی مرتفع از روی تصویر، موجب افزایش دقت کلی طبقه‌بندی می‌شود.

مقایسه کیفی تصویر طبقه‌بندی ادغام‌شده و تصویر ادغام‌نشده

در شکل ۸ مقایسه‌ای بین تصویر حاصل از فرآیند ادغام و تصویر ادغام‌نشده صورت گرفته است و تاثیر تکنیک ادغام تصویر را در نتیجه بصری و کیفی طبقه‌بندی نشان می‌دهد. تصویر سمت چپ خروجی طبقه‌بندی تصویر ادغام‌نشده و تصویر سمت راست نتیجه طبقه‌بندی تصویر ادغام‌شده را نشان می‌دهد. در تصویر سمت چپ رنگ سفید بیانگر مناطق مسکونی و شهری است. به دلیل شباهت طیفی برون‌زدگی‌های سنگی در ارتفاعات با ساختمان‌های مسکونی، در این تصویر کلاس مسکونی با خطا مواجه شده و باعث کاهش دقت طبقه‌بندی شده است. همچنین پوشش مرتعی موجود در نواحی کوهستانی و مرتفع اطراف منطقه مورد مطالعه موجب تداخل کلاسی بین پدیده‌های گیاهی شده و به تبع آن دقت کمی و بصری تصویر خروجی تحت تاثیر قرار گرفته است. تکنیک ادغام تصویر راداری و چندطیفی با حذف ارتفاعات موجود در منطقه مطالعاتی باعث تولید نقشه طبقه‌بندی با کیفیت و همچنین افزایش دقت طبقه‌بندی شده است. این نتیجه براساس تحقیقات راهنما و همکاران (Rahnama *et al.*, 2019) مورد انتظار بود. در تحقیق یاد شده به دلیل عدم حذف نقاط مرتفع کوهستانی برخی پوشش‌های گیاهی به اشتباه به‌عنوان پوشش گیاهی مزارع یونجه در منطقه مورد مطالعه، طبقه‌بندی شده بود.



شکل ۸– مقایسه نقشه طبقه‌بندی و تاثیر ادغام تصویر. راست: تصویر ادغام‌شده، چپ: تصویر ادغام‌نشده

Fig.8. Comparison between output classified maps and the effect of image fusion. Left: output map of Sentinel 2, Right: output map of Sentinel2+ALOS

نتیجه ماتریس آشفتگی مربوط به الگوریتم در شرایط ادغام‌شده بیانگر این است که پدیده‌های گیاهی (گندم، جو و کلزا) با دقت بسیار بالایی از سایر پدیده‌ها جداسازی شده‌اند. در شرایط ادغام‌نشده الگوریتم در ایجاد تمایز بین دو کلاس مسکونی و خاک و همچنین پوشش‌های مختلف گیاهی ضعیف عمل کرد به همین سبب دقت کلی طبقه‌بندی تحت تاثیر این موضوع کاهش یافت. همچنین بیشترین خطای الگوریتم در تفکیک ۳ کلاس جو، درخت و کلزا از سایر کلاس‌ها بود که نتیجه آن افزایش خطای حذف‌شده در این کلاس‌ها و به تبع آن کاهش دقت کلی طبقه‌بندی بود. ماتریس آشفتگی و مشخصات آماری مربوط به ارزیابی دقت طبقه‌بندی سری زمانی NDVI مربوط به منطقه باجگاه در دو وضعیت ادغام‌شده و ادغام‌نشده در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. این نتایج توسط پالوبینسکاس و همکاران در طبقه‌بندی فضای شهری شهر مونیخ نیز به‌دست آمده است. در آن پژوهش خطا در بین کلاس‌های جاده و

ساختمان مسکونی در تصاویر غیر ادغام‌شده ۳۵ درصد بود که پس از ادغام تصاویر ماهواره و رادار این خطا به ۳ درصدکاهش پیدا کرد. (Palubinskas *et al.*, 2011). در پژوهش دیگری از ادغام تصویر ماهواره آلوس با ماهواره لندست۸ برای طبقه‌بندی پوشش گیاهی در مناطق جنگلی در استان بارتین ترکیه استفاده شد و ادغام تصاویر باعث افزایش دقت طبقه‌بندی پوشش گیاهی تا ۹۴/۳۲ درصد شده است. در شرایط ادغام‌نشده میزان دقت کلی ۸۸/۴۰ درصد گزارش شد (Abdikan, 2018).

اگرچه در اکثر مقالات مرور شده در زمینه ادغام تصاویر، دقت طبقه‌بندی در تصویر حاصل از ادغام بیشتر از تصویر غیر ادغام‌شده بوده است اما در پژوهش هانگر و همکاران در طبقه‌بندی عوارضی چون زمین‌های آیش و جنگل بهبود معنی‌داری حاصل نشده است و همچنین در مورد حوضه‌های آبریز استفاده از تصاویر ادغام‌شده باعث کاهش دقت طبقه‌بندی شده است (Hunger, Karrasch, & Wessollek, 2016). خلاصه‌ای از پژوهش‌های یادشده در بخش‌های مقدمه و نتایج برای مقایسه در جدول ۵ آورده شده است.

تخمین سطح زیر کشت محصولات اصلی منطقه مورد مطالعه

جدول ۶ نتایج مربوط به مجموع مساحت زیر کشت اراضی در منطقه مورد مطالعه برای سه محصول گندم جو و کلزا نشان می‌دهد. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که طبقه‌بندی با دقت مناسبی در حالت ادغام تصاویر ماهواره سنتینل۲ و آلوس برای تخمین سطح زیر کشت انجام شده است.

جدول ۳- ماتریس آشفتگی مربوط به طبقه‌بندی عوارض در شرایط ادغام‌نشده ماهواره سنتینل۲

Table 3- Confusion matrix for classification of unfused image of Sentinel 2 satellite

	کلاس Class	جو Barley	کلزا Canola	مسکونی Residential	خاک Soil	درخت Tree	گندم Wheat	سایر Others	مجموع Total	خطای گماشته (٪) Commission Error(%)
		مرجع‌شده Referenced								
طبقه‌بندی‌شده Classified	جو Barley	78	0	0	0	0	0	0	78	0
	کلزا Canola	0	118	0	0	0	0	0	118	0
	مسکونی Residential	0	0	47	0	0	0	0	47	0
	خاک Soil	0	0	1	107	0	0	0	108	0.92
	درخت Tree	2	0	0	3	50	1	0	56	10.71
	گندم Wheat	0	2	0	0	0	129	1	132	2.27
	سایر Others	0	0	2	0	0	0	79	81	2.47
	مجموع Total	80	120	50	110	50	130	80	620	
	خطای حذف‌شده (٪) Omission Error (%)	2.50	1.67	6	2.73	0	0.77	1.25		
	دقت کلی (٪) Overall Accuracy (%)	98.06		ضریب کاپا Kappa coefficient			0.97			

جدول ٤– ماتریس آشفتگی مربوط به طبقه‌بندی عوارض در شرایط ادغام تصاویر ماهواره سنتیل و راداری

Table 4- Confusion matrix for classification of Fused images of Sentinel 2 and radar satellites

	کلاس Class	جو Barley	کلزا Canola	مسکونی Residential	خاک Soil	درخت Tree	گندم Wheat	سایر Others	مجموع Total	خطای گماشته (٪) Commission Error (%)
		مرجع‌شده Referenced								
طبقه‌بندی‌شده Classified	جو Barley	71	0	0	0	0	0	0	71	0
	کلزا Canola	0	94	0	0	0	0	0	94	0
	مسکونی Residential	0	0	45	0	0	0	0	45	0
	خاک Soil	0	0	5	102	0	0	0	107	4.67
	درخت Tree	0	8	0	0	50	10	0	68	26.47
	گندم Wheat	0	0	0	4	0	120	1	125	4
	سایر Others	9	18	0	4	0	0	79	110	28.18
	مجموع Total	80	120	50	110	50	130	80	620	
	خطای حذف‌شده (٪) Omission Error (%)	11.25	21.67	10	7.27	0	7.69	1.25		
	دقت کلی (٪) Overall Accuracy (%)	90.48		ضریب کاپا Kappa coefficient				0.89		

جدول ۵– مقایسه نتایج برخی پژوهش‌های مرتبط

Table 5- An overview of related literature

نوع پوشش **Type of land cover**	روش ادغام **Fusion method**	خلاصه نتیجه **Results Summary**	مرجع **Reference**
تمشک وحشی American Bramble	Sentinel2+ SAR/Sentinel 1 Landsat8+ SAR/Sentinel 1	The overall accuracy was 76% with Sentinel2 + SAR and 72% with Landsat8+SAR, while the accuracy for single unfused images were 65% and 53%, respectively.	Rajah *et al.*, 2018
درخت پالم Palm oil tree	Sentinel2+ SAR/Sentinel 1	The overall accuracy of classification in fusion mode was 84.1% with 11.5% improvement for single imagery.	Monsalve-Tellez *et al.*, 2022
پوشش جنگل Forest	Landsat8+ PALSAR/ALOS	Improved the overall accuracy by up to 7% in fusion mode.	Abdikhan, 2018
حوضه های آبریز، زمین‌های زراعی و آیش، مناطق جنگلی و مناطق شهری Water body, Cultivated and Fallow land, Forest, and Urban areas	Sentinel2+ SAR/Sentinel1	Improved the overall accuracy by up to 30% in the fused image versus single imagery. The producer’s and user’s accuracy were significantly improved in cultivated land and urban area classification. The Forest and fallow lands classifications were not significantly different. The water body was negatively affected in the fused mode.	Hunger *et al.*, 2016
زیرساخت‌های شهری Urban infrastructure	Worldview-2+Terra SAR/ Spotlight	Improved the classification accuracy of infra-structure and reduced the errors by 32%.	Palubinskas *et al.*, 2011

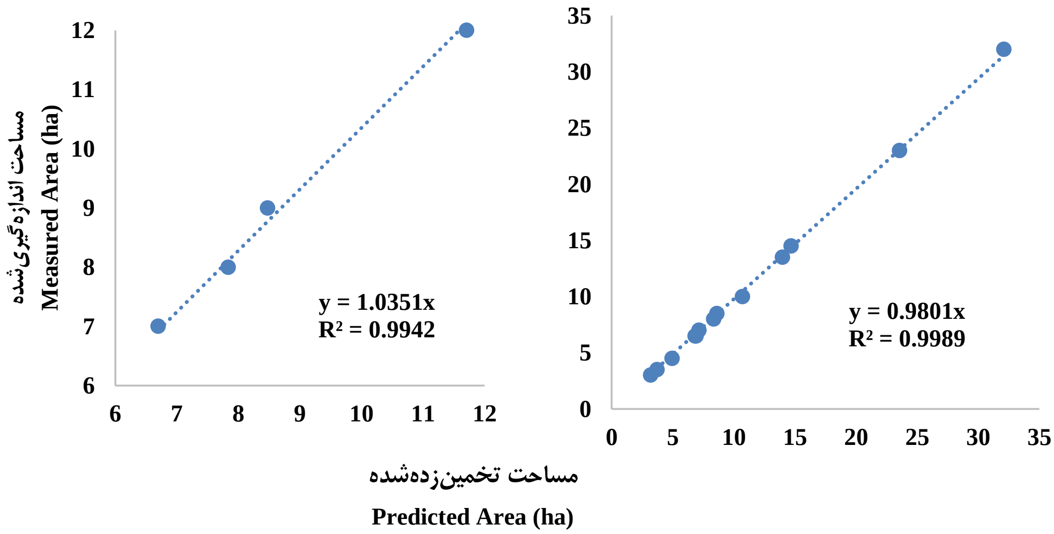
کمترین درصد تغییر مساحت تخمین‌زده‌شده نسبت به مساحت واقعی مربوطه به تنها مزرعه جو موجود در منطقه است و بیشترین درصد تغییر مربوط به مزرعه کلزا است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در مزارع گندم و جو تخمین مساحت بر اساس سنجش از دور با بیش تخمینی و در مورد کلزا مساحت کمتر تخمین زده شده است. علامت منفی در ستون درصد تغییر مبین همین مسئله است.

جدول ٦– مساحت اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده کلاس‌های زمین زراعی در منطقه مورد مطالعه

Table 6- Measured vs. predicted cultivated area in the region of study

کلاس **Class**	مساحت اندازه‌گیری‌شده **Measured Area (ha)**	مساحت تخمین‌زده‌شده **Predicted Area (ha)**	درصد تغییر **Difference percentage**
گندم **Wheat**	140	144.2	3
جو **Barley**	5.5	5.58	1.5
کلزا **Canola**	36	34.7	-3.6

شکل‌های ۹ راست و چپ به‌ترتیب مساحت تخمین‌زده‌شده (محور افقی) در مقابل مساحت اندازه‌گیری‌شده (محور عمودی) زمین‌های زراعی زیر کشت گندم و کلزا را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر نقطه دایره‌ای مساحت مربوط به یک قطعه مزرعه را نشان می‌دهد و خط‌چین رابطه رگرسیونی بین این دو مساحت را نمایش می‌دهد. همان‌طور که معادله رگرسیونی و ضریب تبیین در هر نمودار نشان می‌دهد مساحت‌های تخمین‌زده‌شده نسبت به مساحت‌های واقعی دقت مناسبی دارد و تقریبا بر روی خط معیار y=x قرار گرفته است. ضریب زاویه خط بزرگ‌تر از مقدار واحد در کلزا و کمتر از واحد در گندم مطابق آن‌چه در جدول ۶ هم بیان شد به‌ترتیب به دلیل تخمین کمتر از واقعی و بیشتر از واقعی در کلزا و گندم است.



شکل ۹– نمودار رابطه بین مساحت تخمین‌زده‌شده و واقعی مزارع در منطقه مورد مطالعه. راست: گندم و چپ: کلزا

Fig.8. Regression relations between predicted vs. measured cultivated area in the ROI**.** Left: Canola, Right: Wheat

نتیجه‌گیری

محور اساسی این پژوهش طبقه‌بندی پوشش‌های گیاهی و ادغام تصاویر رادار و چندطیفی به‌منظور بالا بردن دقت طبقه‌بندی بوده است. از آن‌جا که در محدوده مطالعاتی مناطق مرتفع و کوهستانی وجود داشت، به‌منظور حذف نقاط مرتفع از روش ادغام تصاویر بهره گرفته شد. به این منظور تصاویر راداری سنجنده PALSAR با توان تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و تصاویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ با توان تفکیک ۱۰ متر به روش ادغام در سطح پیکسل با هم ترکیب شدند. این فرآیند، با حذف نقاط کوهستانی و مرتعی، افزایش کیفیت بصری نقشه تولیدی و همچنین افزایش دقت طبقه‌بندی براساس

شاخص‌های ارزیابی با ماتریس آشفتگی را به دنبال داشت. مقایسه مساحت تخمین‌زده‌شده و واقعی مزارع گندم، جو و کلزا که بیشترین سطح زیر کشت را داشتند نشان داد که تصاویر ماهواره سنتینل در شرایط ادغام برای این منظور دقت بالایی دارد.

References

1. Abdikan, S. (2018). Exploring image fusion of ALOS/PALSAR data and LANDSAT data to differentiate forest area. *Geocarto International*, *33*, 21-37. https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1222635
2. Ahmad, A. (2005). Change detection in high density urban area and rural area using high resolution satellite image .Atılım Üniversitesi.
3. Arekhi, S., & Adibnejad, M. (2011). Efficiency assessment of the of Support Vector Machines for land use classification using Landsat ETM+ data (Case study: Ilam Dam Catchment). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, *18*, 420-440. (in Persian). https://doi.org/10.22092/ijrdr.2011.102175
4. Bounoua, L., Collatz, G., Los, S., Sellers, P., Dazlich, D., Tucker, C., & Randall, D. (2000). Sensitivity of climate to changes in NDVI. *Journal of Climate*, *13*, 2277-2292. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2277:SOCTCI>2.0.CO;2
5. Efimov, A. I., Kolchaev, D. A., Nikiforov, M. B., & Novikov, A. I. (2018). *Algorithm of geometrical transformation and merging of radar and video images for technical vision systems*. Pages 1-4. 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): IEEE. https://doi.org/10.1109/meco.2018.8406061
6. Fang, L., He, N., Li, S., Ghamisi, P., & Benediktsson, J. A. (2017). Extinction profiles fusion for hyperspectral images classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *56*, 1803-1815 https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2768479
7. Gomez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *116*, 55-72. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008
8. Hunger, S., Karrasch, P., & Wessollek, C. (2016). Evaluating the potential of image fusion of multispectral and radar remote sensing data for the assessment of water body structure. Pages 374-384. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII: SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2241264
9. Johnson, S. J. (2009). An evaluation of land change modeler for ARCGIS for the ecological analysis of landscape composition. Southern Illinois University at Carbondale.
10. Knorn, J., Rabe, A., Radeloff, V. C., Kuemmerle, T., Kozak, J., & Hostert, P. (2009). Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images. *Remote Sensing of Environment*, *113*, 957-964. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.010
11. Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, *15*, 91-100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-t
12. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
13. Malingreau, J., Tucker, C., & Laporte, N. (1989). AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *International Journal of Remote Sensing*, *10*, 855-867. https://doi.org/10.1080/01431168908903926
14. Monsalve-Tellez, J. M., Torres-León, J. L., & Garcés-Gómez, Y. A. (2022). Evaluation of SAR and Optical Image Fusion Methods in Oil Palm Crop Cover Classification Using the Random Forest Algorithm. *Agriculture*, *12*, 955. https://doi.org/10.3390/agriculture12070955
15. Myneni, R. B., Asrar, G., Tanre, D., & Choudhury, B. J. (1992). Remote sensing of solar radiation absorbed and reflected by vegetated land surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*, 302-314. https://doi.org/10.1109/36.134080
16. Nouri, H., Anderson, S., Sutton, P., Beecham, S., Nagler, P., Jarchow, C. J., & Roberts, D. A. (2017). NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands. *Science of the Total Environment*, *584*, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.130
17. Palubinskas, G., Makarau, A., & Tao, J. (2011). Fusion of optical and radar data for the extraction of higher quality information.
18. Rahnama, S., Maharlooei, M., Rostami, M., & Maghsoudi, H. (2018). *Date palm identification using Sentinel and Landsat satellites imagery*. Pages 1. 2018 ASABE Annual International Meeting: American Society of Agricultural and Biological Engineers. https://doi.org/10.13031/aim.201801777
19. Rahnama, S., Maharlooei, M., Rostami, M. A., & Maghsoudi, H. (2019). Determining the Best Classification Algorithm in order to Estimate the Area under Date Palm Cultivation using LANDSAT 8 Satellite Imagery. *Journal of Agricultural Machinery*, *9*(2), 321-335. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.67310
20. Rajah, P., Odindi, J., & Mutanga, O. (2018). Feature level image fusion of optical imagery and Synthetic Aperture Radar (SAR) for invasive alien plant species detection and mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *10*, 198-208. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.007
21. Senay, G., & Elliott, R. (2000). Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial

dynamics of vegetation. *Forest Ecology and management*, *128*, 83-91. https://doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00275-3

22. Tuia, D., Merenyi, E., Jia, X., & Grana-Romay, M. (2014). Foreword to the special issue on machine learning for remote sensing data processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *7*, 1007-1011. https://doi.org/10.1109/jstars.2014.2311915
23. Wang, H., Li, Q., Gao, Z., Sun, B., & Du, X. (2014). A*ssessment of land degradation using time series trends analysis of vegetation indictors in Beijing-Tianjin dust and sandstorm source region*. Pages 753-756. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium: IEEE. https://doi.org/10.1109/igarss.2014.6946533
24. Zhang, M., Ghamisi, P., & Li, W. (2017). Classification of hyperspectral and LIDAR data using extinction profiles with feature fusion. *Remote Sensing Letters*, *8*, 957-966. https://doi.org/10.1080/2150704x.2017.1335902